

복합적층 원뿔형 셸의 링 보강효과 연구

박원태[†] · 최재진 · 손병직^{*}

천안공업대학 토목과 · ^{*}서울시립대학교 토목공학과
(2003. 9. 8. 접수 / 2003. 12. 5. 채택)

A Study on the Ring Effects of Composite Laminated Conical Shells

Weon-Tae Park[†] · Jae-Jin Choi · Byung-Jik Son^{*}

Department of Civil Engineering, Cheonan National Technical College

^{*}Department of Civil Engineering, University of Seoul

(Received September 8, 2003 / Accepted December 5, 2003)

Abstract : In this study, composite laminated conical shells with ring stiffeners are analyzed. A versatile 4-node shell element which is useful for the analysis of conical shell structures is used. An improved flat shell element is established by the combined use of the addition of non-conforming displacement modes and the substitute shear strain fields. The proposed element has six degrees of freedom per node and permits an easy connection to other types (beam element) of finite elements. And 3-D beam element is used for ring stiffeners.

Optimum location and optimum section properties of ring stiffeners are obtained. It is shown that the thickness of conical shell is reduced about 20% by optimum ring stiffeners.

Key Words : composite laminated, conical shells, ring stiffeners, improved flat shell element.

1. 서 론

토목구조물에 사용하는 재료로는 대부분 콘크리트나 강재가 사용되어 왔으나, 최근에는 구조물이 대형화됨에 따라 경량 재료의 사용이 요구되고 있다. 이러한 경량 재료는 중량이 가볍고 필요한 강성을 가지며 내구성이 우수한 재료를 필요로 하고 있으며 대표적인 재료로 각광을 받는 재료가 복합재료이다. 복합재료는 두 가지 이상의 재료적 특성 즉, 직교이방성 재료특성을 갖는 서로 다른 재료들을 적층시켜 전체적인 강성을 효과적으로 발휘하도록 제작된 구조재료를 말한다. 특히 방향성을 갖는 단일소재만으로 구성된 구조재보다 구조적으로 약한 방향을 보강하도록 적층시킨 복합재료는 구조적 효율성이 뛰어난 구조물로 제작할 수 있는 장점을 지니고 있을 뿐만 아니라 손쉽게 제작할 수 있다는 점에서 높은 평가를 받는 구조재이다. 그러므로 여러 선진국에서는 경량구조물로 제작이 요구되는 선박, 항공기, 자동차

산업뿐만 아니라 최근 토목, 건축 산업에서도 복합재료를 사용하려는 시도가 이루어지고 있다⁶⁻⁸⁾.

본 연구에서는 복합재료로 구성된 원뿔형 셸 구조를 해석모델로 하여 보강효과에 대해서 고찰하였다. 셸 구조의 보강방안은 크게 세가지로 구분할 수 있다. 즉, 셸의 단면을 크게 하는 방법, 복합재료를 사용하는 방법 그리고 보강재로 보강하는 방법이다. 본 연구에서는 위의 세가지 방법 중 복합재료를 사용하는 방법과 보강재로 보강하는 방법을 이용하였다.

지금까지 좌굴 및 자유진동에 관한 셸 구조의 보강재 보강효과에 관한 연구는 어느 정도 이루어졌으나, 처짐 및 응력해석은 연구가 미비하며, 있더라도 등방성인 재료를 토대로 연구가 행해지고 있다¹⁻³⁾.

본 연구의 목적은 복합재료의 특성 및 이점을 규명하고, 원뿔형 셸구조의 링 보강효과에 대해서 고찰하는데 있다. 즉, 최적의 링 보강위치를 결정하고, 최적의 링의 단면크기를 결정하였다. 이렇게 결정된 링 보강재로 보강할 경우 셸 두께의 감소효과에 대해서도 연구하였으며, 높은 강성을 가질 수 있는 화이버의 적절한 보강방안을 제시하였다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
pwtae@cntc.ac.kr

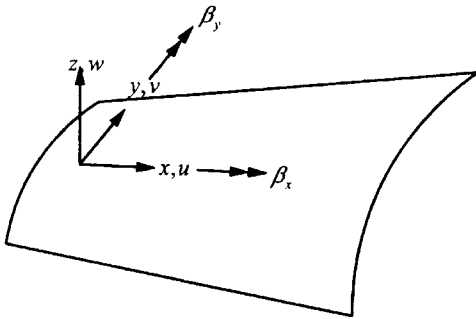


Fig. 1. The cylindrical coordinate system and displacement fields of conical shell

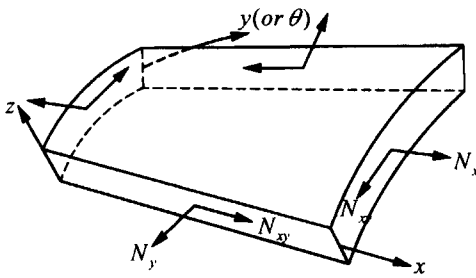


Fig. 2. In-plane forces for conical shells

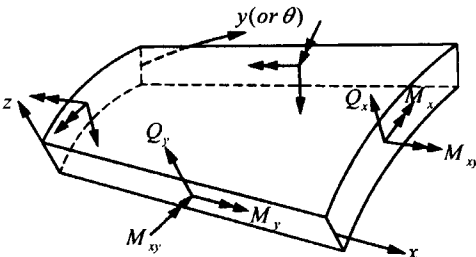


Fig. 3. Out-of-plane forces for conical shells element

2. 기본 이론^{6,9)}

본 연구에서는 복합적층 원뿔형 셸의 링 보강효과에 대해서 연구하였다. Fig. 1은 해석모델의 미소 요소에 대한 좌표계 및 변위장을 나타내며, Fig. 2는 면내력을, Fig. 3은 면외력을 나타낸 것이다.

Fig. 2와 Fig. 3의 합응력과 변형을 관계는 식 (1), (2), (3)과 같다.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} Q_y \\ Q_x \end{Bmatrix} = K_i \begin{bmatrix} A_{44} & A_{45} \\ A_{45} & A_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz}^0 \\ \gamma_{xz}^0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} (A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) &= \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \bar{Q}_{ij}(1, z, z^2) dz \\ &= \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} [\bar{Q}_{ij}]_k(1, z, z^2) dz \end{aligned} \quad (4)$$

이고, A_{ij} 는 면내력 강도, B_{ij} 는 휨-면내력 연계강도, D_{ij} 는 휨강도 그리고 K_i 는 전단보정계수를 의미한다. 또한 \bar{Q}_{ij} 는 재료축에서의 재료강도를 구조축으로 좌표변환하여 구한 재료강도를 나타낸다.

3. 유한요소법

3.1. 개요

본 논문에서는 여러 가지 수치해석 기법 중 구조해석시 적용성이 뛰어난 유한요소법을 사용하였다. 유한요소법에서 셸요소에 대한 연구는 70년대 이래로 계속해서 발전되어오고 있으며, 현재에도 개발이 진행중에 있다. 셸요소는 크게 세가지에 토대를 두고 있다. 즉, 평면셸요소(flat shell element), 셸 이론을 토대로 한 곡선요소(curved element), 3차원 요소로 유도된 감절점셸요소(degenerated shell element)이다.

위의 세가지 요소는 각각 장단점을 가지고 있다. 평면셸요소는 적용성은 우수한 반면 요소수를 많이 세분화해야 하는 단점이 있으며, 곡선요소는 높은 정확성을 갖는 반면 많은 부가적인 단점을 가지고 있으며, 감절점셸요소는 정확성은 높으나 절점당 6개의 자유도를 가지는 다른 요소(예 : 보요소 등)와의 결합에서 다소 어려운 단점을 지니고 있다¹¹⁾.

본 연구에서 사용한 셸요소는 평면셸요소를 선택하여 해석을 수행하였다. 평면셸요소는 본 논문에서 고려한 링 보강재가 고려될 경우 적용성을 높이며, 요소를 적당히 세분화하면 좋은 정도를 얻을 수 있게 된다. 또한 링 보강재의 요소는 3차원 보요소^{4, 13)}를 사용하여 해당 자유도에 중첩을 시켜 해석을 수행하였다.

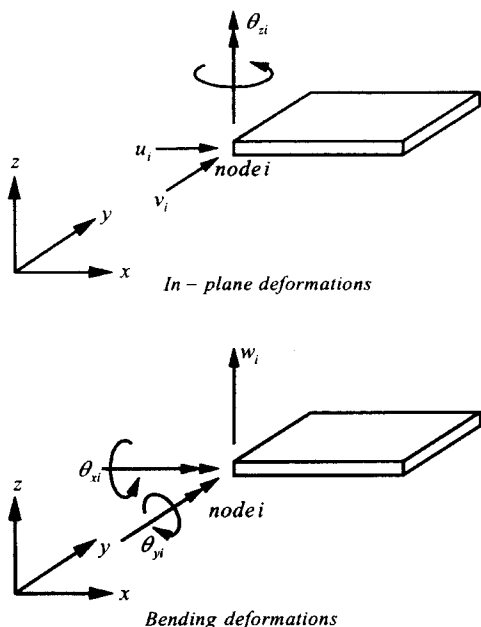


Fig. 4. The six degrees of freedom of a flat element

3.2 평면셀요소

Fig. 4는 평면셀요소의 자유도를 나타낸 것이며, 면내 회전자유도(θ_z)가 추가되어 셀구조의 해석이나 보요소와의 결합에 유용하게 사용할 수 있다.

기존의 셀요소들은 잠김(locking) 현상과 같은 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 비적합 모드, 직접수정법, 대체전단 변형률을 사용하여 요소를 개선시켰으며⁵⁾, 복합재료를 사용할 수 있게 재구성 하였다.

식 (5)와 같은 비적합 모드를 사용함으로써 실제 발생할 수 있는 변위 형태를 복원시켜 높은 정확성과 빠른 수렴성을 확보하였다. 그러나 비적합 모드의 사용은 요소간의 변위 적합성을 만족하지 못한다. 직접수정법(식 (8)의 $-\frac{2}{3}$)을 이용함으로써 조각 시험(patch test)을 통과할 수 있게 된다. 또한, 전단 잠김(shear locking) 현상을 제거하기 위해서 대체전단 변형률장식 (7)의 MX_i, MY_i, LX_i, LY_i 을 도입하였다. 이상과 같이 개선된 평면셀요소의 변형률-변위 관계식은 식 (6)과 같고, 은 각각 식 (7), (8)과 같다⁵⁾.

$$N_1 = 1 - \xi^2, \quad N_2 = 1 - \eta^2 \quad (5)$$

$$\varepsilon = [B_c \quad B_n] \begin{Bmatrix} \delta_c \\ \delta_n \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서, 아래첨자 c 는 적합모드의 약자이며 n 은 비적합모드의 약자를 의미한다.

$$B_c = \begin{bmatrix} N_{i,x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_{i,y} & 0 & 0 & 0 \\ N_{i,y} & N_{i,x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -N_{i,y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -N_{i,x} & 0 \\ 0 & 0 & N_{i,x} & MY_i & 0 \\ 0 & 0 & N_{i,y} & LX_i & LY_i \end{bmatrix} 8 \times 20 \quad (7)$$

$$B_n = \begin{bmatrix} \bar{N}_{1,x} & 0 & \bar{N}_{2,x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{N}_{1,y} & 0 & \bar{N}_{2,y} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{N}_{1,y} & \bar{N}_{1,x} & \bar{N}_{2,y} & \bar{N}_{2,x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{N}_{1,x} & \bar{N}_{2,x} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\bar{N}_{1,y} & -\bar{N}_{2,y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\bar{N}_{1,x} & -\bar{N}_{2,x} & \bar{N}_{1,y} & \bar{N}_{2,y} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{N}_1 - \frac{2}{3} & \bar{N}_2 - \frac{2}{3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\bar{N}_1 - \frac{2}{3}) & -(\bar{N}_2 - \frac{2}{3}) \end{bmatrix} 8 \times 8 \quad (8)$$

최종적으로 강성행렬은 식 (9), (10)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} B_c \\ B_n \end{bmatrix} [E] [B_c B_n] = \begin{bmatrix} k_{cc} & k_{cn} \\ k_{cn}^T & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_c \\ \delta_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$$\bar{N}_{cc} = k_{cc} - k_{cn} k^{-1}_{nn} k_{cn}^T \quad (10)$$

여기에 면내 회전자유도(θ_z)를 추가하여 정리하면 다음과 같은 국부좌표계에서의 강성 매트릭스 k_{flat} 를 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} f \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta_c \\ \theta_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{k}_{cc} & 0 \\ 0 & k_{\theta z} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_c \\ \theta_z \end{Bmatrix} \quad (11)$$

여기서⁴⁾,

$$k_{\theta z} = k_{ip}(E_x + E_y)tA \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & 1 & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & 1 & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

4. 해석 예 및 결과분석

4.1. 해석모델

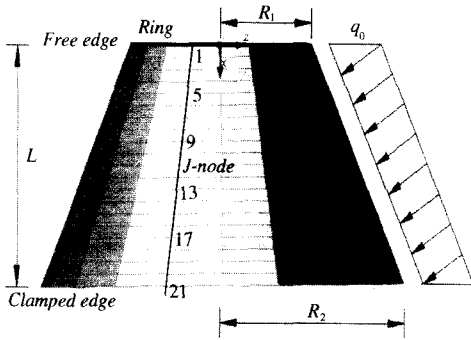


Fig. 5. Analysis model with ring stiffener
 ($R_1 = 10in$, $R_2 = 20in$, $L = 10 \sim 50in$, Thickness = $1in$, $q_0 = 50ksi$)

Table 1. Material properties of shell element (Unit : ksi)

Material A (Steel)	$E = 30,000$, $\nu = 0.3$ $G = E/2(1 + \nu)$
Material B (Boron/Epoxy)	$E_1 = 30,000$, $E_2 = 3,000$ $G_{12} = G_{13} = 1,000$ $G_{23} = 600$, $\nu_{12} = 0.3$

Table 2. Material properties and section properties of ring stiffener

Material (Steel)	$E = 30,000ksi$, $\nu = 0.3$ $G = E/2(1 + \nu)$
Material (Boron/Epoxy)	$B = 2in$ (Width of Ring Section) $H = 2in$ (Height of Ring Section)

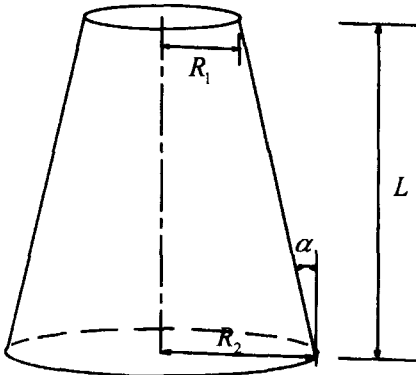


Fig. 6. Clamped conical shell under uniform pressure
 (Length $L = 100in$; Radius $R_1 = 10in$, $R_2 = 20in$;
 Thickness $t = 1in$; Elastic modulus $E = 3000ksi$;
 Poisson's ratio $\nu = 0.3$; Pressure load $q = 1ksi$)

본 연구의 해석모델은 Fig. 5와 같이 폐합되고 등분포 외압을 받는 원뿔형 쉘로 설정하였다. 링 보강재의 위치는 20등분으로 했을 경우 그림과 같이 변화시켜서 파라미터 연구를 수행하였다.

Table 3. Comparison of present solution and Ref. [1]

Mesh	Central radial displacement		ERR (%)
	Present Study	Ref.[14] - F.D.M	
6x6	0.06072	0.07200	15.67
12x12	0.06704	0.07006	4.31
18x18	0.06803	0.06909	1.53
24x24	0.06834	0.06899	0.94
30x30	0.06849	0.06887	0.55
36x36	0.06857	0.06881	0.35
42x42	0.06861	0.06876	0.22

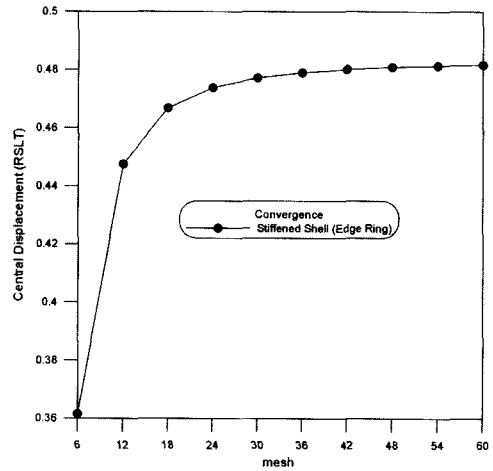


Fig. 7. Convergence of analysis model (Material A)

Table 1은 쉘요소의 물성치를 나타내며, 강재인 경우와 boron화이버가 epoxy에 묻혀있는 복합재료를 사용하였다. Table 2는 링 보강재의 단면특성치와 물성치를 나타낸다.

4.2. 프로그램의 타당성 검토

2, 3장의 이론으로부터 작성된 본 해석 프로그램의 타당성을 검증하고자 관련논문과 비교를 하였고, 링 보강재가 보강되었을 경우의 수렴성을 분석하였다. Fig. 6은 관련논문과 비교하기 위한 모델을 나타내며, Table 3에 비교 결과가 나타나 있고, Fig. 7은 링으로 보강된 원뿔형 쉘의 수렴도를 나타낸 것이다. 24x24이상에서 99%이상의 일치율을 보이고 있으며, 수렴성도 양호함을 알 수 있다.

4.3 등방성 재료(Material A)에 대한 결과분석

Fig 8은 링 보강재의 위치에 따라서 변위와 응력을 도시한 것이다. 변위RSLT는 합변위 $\sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$ 를 의미하고, 합응력은 원뿔형 쉘에서 가장 지배적

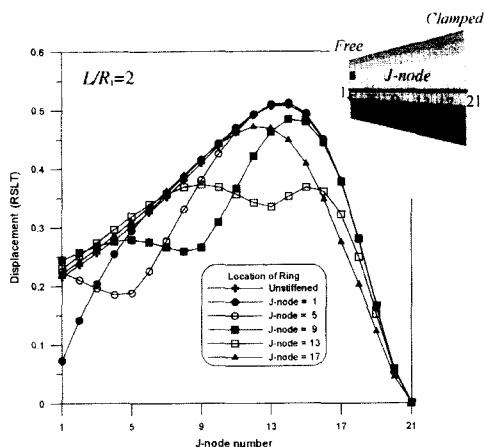


Fig. 8-a. Displacement RSLT by location of ring

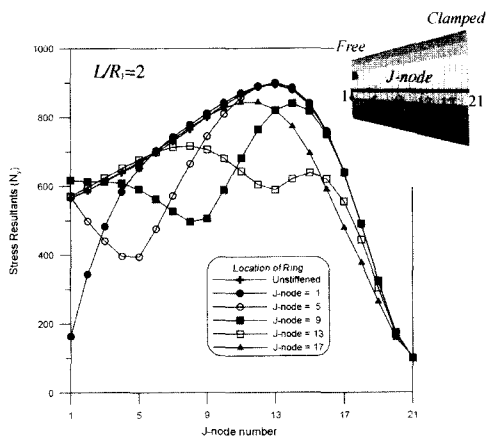


Fig. 8-b. Stress resultants by location of ring

인 N_y 만을 도시하였다.

Fig. 8은 보강재의 효과를 대표적으로 도시한 그림이며, Table 4에 변장비 (L/R_1)에 따라서 링 보강재의 효과가 잘 나타나있다. 보강재의 최적의 위치는 J-node로 표시되고, 변장비가 커질수록 하단으로 보강하는 것이 유리함을 알 수 있다. 또한 최적의 두께비 (H_{beam}/t_{shell})를 구하고자 Fig. 9를 도시하였다. Fig. 9는 가로축이 보강재의 두께와 쉘의 두께비를 나타내고, 0은 보강재가 없는 경우를 나타내며, 10은 10배가 아니라 강재로 고정단으로 만들었을 경우를 의미한다. 보강재는 Table 4에 나타난 J-node에 위치시켰다. Table 4와 Fig. 9를 종합해보면 변장비에 따라서 다소 차이가 있고, 변위와 함응력에 따라서 다소 차이가 있지만, 대략적으로 최적의 두께비는 약 $H_{beam}/t_{shell} = 2$ 정도로 사료된다.

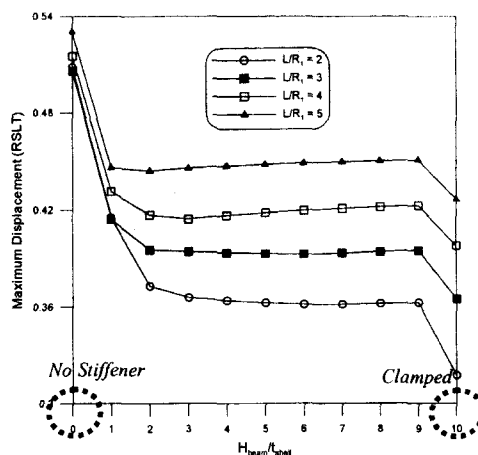


Fig. 9-a. Maximum displacement RSLT by

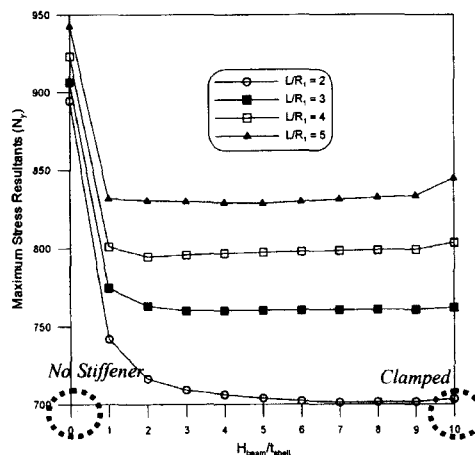


Fig. 9-b. Maximum stress resultants by

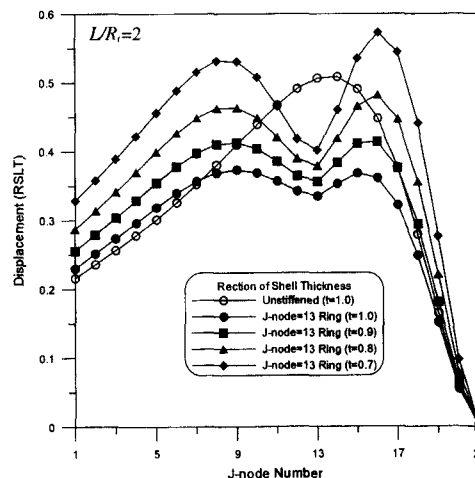


Fig. 10. Displacement RSLT by reduction of shell thickness

Table 4-a. Optimum location and optimum H_{beam}/t_{shell} of ring for Material A (RSLT)

L/R_1	Maximum Displacement RSLT						Optimum H/t See Fig. 9-a
	Unstiffened	Stiffened (Optimum Location of Ring)					
	$t = lin$	J-node	$H/t=1$	$H/t=2$	$H/t=3$	Clamped	
1	0.62942	9	0.51512	0.45072	0.44016	0.40083	$H/t=3$
2	0.50846	13	0.41524	0.37284	0.36573	0.31747	$H/t=3$
3	0.50570	15	0.41408	0.39533	0.39421	0.36493	$H/t=2$
4	0.51517	16	0.45127	0.44384	0.44050	0.42048	$H/t=2$
5	0.53035	17	0.44594	0.44559	0.44388	0.42642	$H/t=2$

Table 4-b. Optimum location and optimum H_{beam}/t_{shell} of ring for Material A (N_V)

L/R_1	Maximum Displacement N_V						Optimum H/t See Fig. 9-b
	Unstiffened	Stiffened (Optimum Location of Ring)					
	$t = lin$	J-node	$H/t=1$	$H/t=2$	$H/t=3$	Clamped	
1	963.2934	9	815.1841	827.7937	836.9048	884.6743	$H/t=1$
2	894.3830	13	741.9020	716.5076	709.1461	703.2864	$H/t > 3$
3	906.5193	15	774.5294	762.8977	759.8552	761.8151	$H/t=2$
4	923.0208	16	835.8659	823.6732	824.2564	825.1204	$H/t=2$
5	942.4768	17	831.5224	830.3400	829.5301	844.5519	$H/t=2$

Table 5. Reduction effects of shell thickness for Material A

$H_{beam}/t_{shell} = 2$

L/R_1	Maximum Displacement RSLT						Thickness Reduction (%)
	Unstiffened	Stiffened (Optimum Location of Ring)					
	$t = lin$	J-node	$H/t=1$	$H/t=2$	$H/t=3$	Clamped	
1	0.62942	9	0.45072	0.50920	0.58865	0.70030	23.65%
2	0.50846	13	0.37284	0.41388	0.48202	0.57290	22.91%
3	0.50570	15	0.93533	0.44037	0.49767	0.57252	21.07%
4	0.51517	16	0.44384	0.46440	0.52526	0.61492	18.34%
5	0.53035	17	0.44559	0.49529	0.56032	0.64466	15.39%

Table 5는 최적의 위치에 최적의 두께비로 보강했을 경우 셸 단면의 감소 효과에 대해서 나타낸 것이다. 변장비에 따라서 약 15~23%의 감소효과를 보았다. 변장비가 커짐에 따라서 감소효과가 적게 나타났다.

4.4 복합재료(Material R)에 대한 결과분석

본 절에서는 복합재료에 대해서 결과를 분석하였다. Table 6은 변장비(L/R_1)가 2와 5일 경우에 대해서 링 보강재의 최적의 위치를 나타낸 것이다. 화이버 보강각도에 따라서 최적의 위치가 다소 다르게 나타났다. 화이버 보강각도가 0도일 경우 함용력은 유리하나 변위가 불리하고, 90도일 경우는 그 반대로 나타났다. 또한 90도로 보강할 경우 변위에 대한

링 보강재의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 적절한 화이버 보강각도는 0도와 90도를 적층시킨 0/90/90/0이나 90/0/090의 형태가 가장 유리하다고 판단된다.

Table 7은 0/90/90/0으로 적층시켰을 경우에 링 보강재에 의한 셸 두께의 감소효과를 나타낸 것이다. 약 11~23%의 감소효과를 보였으며, 변장비가 커질수록 감소효과가 적게 나타났다.

5. 결론

지금까지 복합재료로 구성된 원뿔형 셸구조의 링 보강효과에 대해서 토론했다. 셸요소는 개선된 평면셸요소를 사용하였고, 링 보강재 요소는 3차원 보

Table 6-a. Optimum location of ring for Material B ($L/R_1 = 2$)

Fiber Angle ($^\circ$)	Maximum Displacement RSLT			Maximum Stress Resultants N_r		
	Unstiffened	Stiffened (Optimum Location)		Unstiffened	Stiffened (Optimum Location)	
	$t = 1in$	J-node	$H/t = 2$	$t = 1in$	J-node	$H/t = 2$
0/0/0/0	4.073602	9	2.421352	759.0939	8	573.8624
3030/30/30	4.322309	9	2.802206	770.7385	9	682.7701
60/60/60/60	3.286517	11	2.789088	860.9295	12	667.6905
90/90/90/90	1.757475	2*	1.737136	970.6669	15	823.3937
0/90/90/0	1.041745	13	0.784743	887.8730	12	698.7907

* 변위에 대해서 링의 효과가 거의 없다. (90/90/90/90인 경우)

Table 6-b. Optimum location of ring for Material B ($L/R_1 = 5$)

Fiber Angle ($^\circ$)	Maximum Displacement RSLT			Maximum Stress Resultants N_r		
	Unstiffened	Stiffened (Optimum Location)		Unstiffened	Stiffened (Optimum Location)	
	$t = 1in$	J-node	$H/t = 2$	$t = 1in$	J-node	$H/t = 2$
0/0/0/0	4.888515	15	3.564092	852.2201	14	695.5010
3030/30/30	5.061830	14	3.891081	859.3764	14	706.1228
60/60/60/60	6.467721	17	5.855062	935.0855	17	854.2621
90/90/90/90	3.183298	1*	3.181783	982.2696	18	898.5833
0/90/90/0	1.060064	17	0.959054	927.7656	17	827.6627

* 변위에 대해서 링의 효과가 거의 없다. (90/90/90/90인 경우)

Table 7. Reduction effects of shell thickness for Material B (0/90/90/0)

$$H_{beam} / t_{shell} = 2$$

L/R_1	Maximum Displacement RSLT						Thickness Reduction (%)
	Unstiffened	Stiffened (Optimum Location of Ring)					
	$t = 1in$	J-node	$t = 1in$	$t = 0.9in$	$t = 0.8in$	$t = 0.7in$	
1	1.308836	9	0.948730	1.069337	1.232404	1.460802	23.34 %
2	1.041745	13	0.784742	0.883553	1.011853	1.184167	21.73 %
3	1.026060	15	0.837443	0.933203	1.054261	1.211751	17.67 %
4	1.041615	16	0.881257	0.981944	1.109565	1.276243	14.67 %
5	1.060064	17	0.959054	1.046464	1.182408	1.358393	11.00 %

요소를 사용하여 해석을 수행하여, 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻었다.

1) 링 보강재의 최적의 위치는 변장비에 따라 다르게 나타나며, 변장비가 커짐에 따라 하단으로 보강함이 유리함을 알 수 있다.

2) 복합재료를 사용한 경우 링 보강재의 최적의 위치는 화이버 보강각도에 따라서 다소 달리 나타나며, 0/90/90/0 또는 90/0/0/90으로 보강시키는 것이 유리하며, 여기에 링 보강재로 보강하면 최적의 원뿔형 셸구조를 만들 수 있으리라 기대된다.

3) 링 보강재의 최적의 두께는 변장비에 따라 다소 다르게 나타나지만, 대략 셸두께의 2배정도로 사

료된다.

4) 최적 두께의 링 보강재가 최적의 위치에 보강되면 셸 단면을 약 10~20%정도 감소시킬 수 있으며, 변장비가 커질수록 감소효과가 적게 나타났다.

참고문헌

- 1) A.A. El Damatty, E.G. Marroquin, M. El Attar, "Behavior of stiffened liquid-filled conical tanks", *Thin-Walled Structures* 39, pp. 353~273, 2001.
- 2) A.E. Assan, "Analysis of multiple stiffened barrel shell structures by strain-based finite elements", *Thin-Walled Structures* 35, pp. 233~253, 1999.

- 3) B. Gangadhara Prushy, S.K. Satsangi, "Analysis of stiffened shell for ships and ocean structures by finite element method", Ocean Engineering 28, pp. 621~638, 2001.
- 4) LUSAS Theory Manuel (Ver 13.4), FEA Ltd., 2001.
- 5) C. K. Choi and P. S. Lee, "Defect-free 4-node flat shell element : NMS-4F element", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 8, pp. 207~231, 1999.
- 6) J. N. Reddy, "Mechanics of Laminated Composite Plates", CRC press, 1997.
- 7) Robert M. Jones, "Mechanics of Composite Materials", McGraw-Hill, 1975.
- 8) Jack R. Vinson, Tsu-wei Chou, "Composite Materials and Their Use in Structures", Applied Science Publishers LTD, 1975.
- 9) Werner Soedel, "Vibrations of Shells and Plates", Marcel Dekker, Inc., 1981.
- 10) Wilhelm Flugge, "Stresses in Shells", Springer-Verlag Berlin, 2nd Ed, 1973.
- 11) E. Hinton, D. R. J. Owen, "Finite Element Software for Plates and Shells", Pineridge Press Limited, 1984.
- 12) R. D. Cook, D. S. Malkus, M. E. Plesha, "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", John Wiley & Sons, 3rd Ed, 1989.
- 13) D. L. Logan, "A First Course in the Finite Element Method", 3rd.
- 14) Son, B. J., "Analysis of Anisotropic Circular Conical Shells", University of Seoul, Master's thesis, 2000.